

수소 정책 동향과 밸류체인별 수소 기술 개발 현황

신재은[†]

한국지질자원연구원 미래전략연구센터

Hydrogen Policy Trends and Current Status of Hydrogen Technology Development by Value Chain

JAE EUN SHIN[†]

Future Geo-Strategy Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

[†]Corresponding author :
jeshin@kigam.re.kr

Received 23 November, 2023
Revised 12 December, 2023
Accepted 18 December, 2023

Abstract >> Carbon neutrality has been suggested to overcome the global climate crisis caused by global climate change. Hydrogen energy is a major way to achieve carbon neutrality, and the developments and policies of hydrogen technology have been proposed to achieve this goal. To commercialize hydrogen energy resources, it is necessary to understand the overall value chain composed of hydrogen production, storage, and utilization and to present the direction of technological developments. In this paper the hydrogen strategies of major countries, including Europe, the United States, Japan, China, and South Korea will be analyzed, and hydrogen technologies by value chain will also be explain. This paper will contribute to understanding the overall hydrogen policy and technology , as both policy and technology are summarized.

Key words : Carbon neutral(탄소중립), Hydrogen(수소), Value chain(밸류체인), Hydrogen policy(수소 정책), Hydrogen technology(수소 기술)

1. 서론

전 세계적으로 폭염, 폭설, 폭우 등의 기상 이변과 자연재해가 발생함에 따라 기후 위기를 극복하기 위하여 탄소경제에서 수소경제로의 변화가 이루어지고 있다¹⁾. 수소경제는 수소에너지를 주요 에너지원으로 사용하고, 수소가 국가경제, 사회 전반, 국민 생활 등에 근본적 변화를 초래하여 경제 성장과 친환경에너

지의 원천이 되는 경제를 의미한다. 이는 석탄, 천연가스, 원자력, 신재생에너지를 활용하여 생산된 수소를 사용하고, 이를 저장 및 활용하는 방식으로 수소를 주요 에너지원으로 사용하는 것을 목적으로 한다. 최근에는 탄소중립을 실현하기 위한 방안으로 수소 기술에 대한 관심이 늘어나고 있으며, 특히 신재생에너지를 활용한 그린 수소 생산 기술과 생산된 수소를 수송 및 발전 분야에 적용하여 온실가스 배출이

없는 에너지원으로 사용하기 위한 노력들이 지속되고 있는 추세다.

수소에너지를 활용하게 되면 특히 에너지 및 환경 측면에서 온실가스 감축 등 오염물질 배출을 저감할 수 있다. 현재 세계적으로 매년 5천만 톤의 수소가 사용되고 있으며, 에너지원뿐만 아니라 반도체 및 디스플레이 제조, 암모니아 제조, 화학 원료, 석유 정제 등 다양한 분야에서 산업용 원료로 사용되고 있다. 수소는 공기 중에서 산소와 단순한 화학반응을 통해 전기와 열을 생산하지만 부산물은 물밖에 없기 때문에 친환경적인 에너지원으로 활용이 가능하다. 수소는 우주물질의 75%를 차지할 정도로 풍부한 자원이지만, 지구상에서는 물이나 유기화합물 형태로 존재하기 때문에 수소를 직접 활용하기 위해서는 기술적 난이도가 매우 높다. 하지만 수소를 생산하게 되면 보급이나 활용을 위한 장기간 대용량 저장이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 상용화에 대한 기대감이 크다. 따라서 국내외에서 수소경제를 선도하기 위해 수소 관련 핵심 기술 개발을 위한 정책을 다양하게 수립하고 있다.

수소 생산 분야에서는 천연가스 및 석탄을 활용하여 대용량의 수소를 제조하는 방식에서 지구온난화에 미치는 영향을 줄이기 위해 온실가스 배출을 최소화하는 방향으로 생산 기술이 개발되고 있으며, 수소 수입도 고려하고 있는 상황이다. 수소를 주 에너지원으로 쓰기 위해서는 국내 보급 및 충전 인프라를 확충해야 하며, 해외 수입 시 필요한 인수기지 및 저장 시설 등이 마련되어야 하므로 수소의 생산부터 저장, 운송, 활용 등에 대한 기술들이 동시에 개발되고 있다.

본 논문에서는 수소 생산, 저장, 운송 및 활용 분야에 대한 전체 수소 밸류체인 내 기술 개발 동향에 대해서 살펴보고자 하며, 이와 관련하여 수소경제를 활성화하기 위해 국내외에서 수소와 관련하여 어떤 정책을 발표하고 실행하고 있는지 동향에 대해 기술하고자 한다.

2. 국내외 정책

뉴딜 및 탄소중립 정책과 연계하여 신재생에너지 부분의 기술 발전이 빠르게 이루어지고 있으며, 이에 따른 정책적인 제안도 지속적으로 발표되고 있다. 온실가스를 감축하기 위한 노력으로 신재생에너지 생산 비율이 빠르게 증가하고 있으며, 특히 전 세계적으로 수소 수요가 급증하여 2050년 수소 산업은 연 2.5조 달러의 부가 가치와 더불어 누적 3,000만 개의 신규 일자리 창출을 전망하고 있다²⁾.

전 세계적으로 다양한 국가에서 수소경제를 모티브로 한 다양한 정책 및 기술 로드맵을 발표하였으며, 국내에서도 수소경제를 선도하기 위한 정책과 비전을 수립하고 있다(Table 1).

2.1 국외 정책

2.1.1 유럽

유럽연합(European Union, EU)에서는 2020년 7월에 ‘hydrogen strategy for a climate-neutral Europe’이라는 수소 전략을 발표하였는데³⁾, 수소는 이산화탄소를 포함한 오염원 배출이 거의 없어 탄소 감축에 효과적이고 적합한 에너지원이라고 판단하여 2050년 탄소중립 목표 달성에 필수 기술이라고 제시하였다. 이에 따라 EU는 유럽청정수소연맹(European Clean Hydrogen Alliance)을 공식적으로 출범하였으며, 수소 분야의 전략 로드맵을 제공하는 역할을 담당하여 공공기관, 산업 및 시민 사회 간 협력을 유도하고 있다³⁾.

EU의 ‘2050 수소 로드맵’에서는 풍력, 태양광에너지에 기반한 그린수소에 주력하고 있지만 현재는 중단기적 과도기 단계로 저탄소수소가 필요하다고 제시하고 있다. 저탄소수소를 사용하기 위해서는 특히 이산화탄소 포집에 대한 가격 경쟁력이 필요하다. 로드맵에서는 유럽의 수소 생태계를 완성하기 위해 2050년까지의 계획을 총 3단계로 구분하여 제시하였다. 1단계인 2020년부터 2024년까지의 계획은 최소 6 GW의 그린수소 전해조 설치, 최대 1백만 톤의 그린수소

Table 1. Hydrogen strategies of major countries¹⁰⁾

	 Europe	 United States	 Japan	 China	 Australia	 South Korea
Strategy	A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe	Road Map to US Hydrogen Economy	Basic Hydrogen Strategy	3060 Target	Australia's National Hydrogen Strategy	Roadmap for revitalizing the hydrogen economy
Organization	European Clean Hydrogen Alliance	Department of Energy (Federal government)	Government	Government	Government	Government
Plan	<ul style="list-style-type: none"> • 2050 Hydrogen Roadmap • Three-step plan by 2050 to transform Europe into a hydrogen ecosystem • One million tons of recycled hydrogen to decarbonize industrial plants and commercialize them in large scale • Ten million tons of recycled hydrogen production and hydrogen as the core role of the integrated energy system • De-carbonization of all fields with regenerated hydrogen technology • To promote the demand for green hydrogen, a carbon difference contract system is introduced, and it is expected to be applied first to the opening and electrification of clean hydrogen in industrial processes 	<ul style="list-style-type: none"> • The road map is organized into four key phases: <ol style="list-style-type: none"> (1) Immediate steps (2020-2022) (2) Early scale-up (2023-2025) (3) Diversification (2026-2030) (4) Broad rollout (2031 and beyond) • Each phase also describes the critical enablers required, categorized as (1) policy enablers and (2) hydrogen supply and end-use equipment enablers • Green hydrogen, blue hydrogen, as well as pink hydrogen, are included in the clean hydrogen range, aiming to achieve a hydrogen economy through complete self-sufficiency • Focuses on supply promotion policies that can lower the cost of producing clean hydrogen through production tax credits, investment tax credits, CCUS tax credits 	<ol style="list-style-type: none"> (1) Dramatic expansion of hydrogen use (from present) (2) Full-fledged introduction of hydrogen power generation and establishment of a large-scale hydrogen supply system (by the second half of the 2020s) (3) Establishment of a CO₂-free hydrogen supply system on a total basis (by around 2040) <ul style="list-style-type: none"> • It is implementing a hydrogen strategy based on leading technology for hydrogen and succeeded in demonstrating maritime transport of liquefied hydrogen carriers for the first time in the world • It aims to import from Australia, South America, and the Middle East because it is challenging to supply clean hydrogen itself 	<ul style="list-style-type: none"> • Medium-to-long-term development plan for hydrogen energy • Use hydrogen as an energy source to achieve decarbonization and carbon neutrality • Invest in hydrogen energy technology as a national research and development project • Introduction of green hydrogen as a direction of hydrogen energy development (Established the world's first green hydrogen standard) 	<ul style="list-style-type: none"> • Building a hydrogen hub, a Large-Scale Hydrogen cluster • (~2022) Creating a hydrogen ecosystem, building a hydrogen hub, and optimizing a global hydrogen supply chain • (2022~2030) Reducing hydrogen unit price, strengthening growth capacity, and developing CCUS technology • (2030~) Expanding the hydrogen economy and securing productivity to meet the demand of Australian hydrogen importers 	<ul style="list-style-type: none"> • Roadmap for hydrogen technology development • Established the world's first legislation on hydrogen economy development and hydrogen safety management • The basic plan for the transition of the hydrogen economy • 2050 Carbon Neutrality Achievement Plan • Hydrogen is selected as a national essential strategic technology • Securing large-scale clean hydrogen supply and related technologies to build a clean hydrogen ecosystem • Application of clean hydrogen certification system

를 생산하여 산업공장 탈탄소화와 대형 상용화를 목표 표로 하였다. 정책면에서는 수소 시장 규제 프레임워크를 도입하고 수소 시장을 활성화하는 방안들이 포

함되어 있으며, 견고한 투자 계획 수립을 지원하는 방식의 내용도 제시되었다. 2단계는 2025년부터 2030년까지의 기간에 최소 40 GW의 전해조 설치, 최소 1천

만 톤 그린수소 생산을 목표로 하며, 수소가 통합 에너지 시스템의 핵심 역할로 확립되도록 하는 방안을 제시하였다. 정책적으로는 단기간 내 지속적 확장을 위해 EU의 지원을 강화하고 본격적 수소 생태계 구축을 위해 투자를 활성화하는 방안을 담고 있다. 3단계는 2030년부터 2050년까지의 기간이며, 성숙 단계에 진입한 그린수소 기술을 통해 탄소 저감이 어려운 전 분야의 탈탄소화 실현하는 것을 최종 목표로 한다. 추가로 단계별 인프라 구축을 위해한 관련 법규 개정도 단계에 따라 순차적으로 진행할 계획을 제시하였다⁴⁾.

EU 집행위원회는 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 발생한 에너지 위기에 대응해 러시아 화석연료를 대체하기 위한 정책으로 ‘RePowerEU’를 발표하였다. 또한 그린수소의 수요를 촉진하기 위해 탄소 차액 계약 제도(carbon contract for difference)의 도입을 추진 중이며, 우선적으로 산업 공정 내 청정수소 도입 및 전기화에 적용할 예정이다⁵⁾.

2.1.2 미국

미국은 2020년 3월 연료전지 및 수소 에너지 협회를 통해 ‘미국 수소경제로의 로드맵(roadmap to a US hydrogen economy)’을 발표하였다⁶⁾. 이 로드맵은 2030년과 2050년 정책 시계에 대하여 기술 발전 단계 및 시장 성숙도 등을 감안하여 향후 수소와 연료전지 사업의 장기 비전과 이를 달성하기 위한 정책 제안을 밝히고 있다. 미국은 캘리포니아 주도로 수소 정책을 추진 중이다. 캘리포니아 주와 연방정부를 중심으로 민간 파트너십을 결성하여 수소에너지 정책을 추진하고 있다. 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)는 다양한 에너지를 보다 저렴하게 생산하고 에너지 생산과 활용을 개선하기 위하여 수소 개발에 많은 관심을 가지고 있으며, 특히 화석연료에서 생산되는 수소를 저탄소 경제로 전환기 위한 중요 요소로 판단하고 기술 개발을 진행 중이다. 화석 에너지국, 재생에너지국, 원자력에너지국 등 DOE 내 유관 부서에서 가스 개질, 블루수소(carbon dioxide capture utilization and storage [CCUS] 기술 연계), 그린

수소(수전해 활용) 등 다양한 기술 발전에 관여하고 있다. 미국은 특히 CCUS 기술 성숙도가 높기 때문에 이를 활용한 블루수소 생산 비중이 높은 편이며 현재 화석연료와 비교해도 kg당 2달러 내외로 가격 경쟁력이 있다. 미국 내 산업에서는 석유 정제, 암모니아 생산 등에 사용되는 수요가 대부분을 차지하며, 2050년까지 발전, 건물, 수송 등의 분야에서도 대규모 수소 수요가 증가할 것이라고 예상된다. 따라서 수소 생산량 증가를 위해 관련 기술 프로젝트 및 ‘수소 프로그램 계획’ 등의 프로그램이 실행되고 있다.

최근에는 그린수소, 블루수소뿐 아니라 핑크수소도 청정수소 범위에 포함하여 완전한 자급을 통한 수소경제 달성을 목표로 하고 있으며, 생산 세액 공제, 투자 세액 공제, CCUS 세액 공제 등을 통해 청정수소의 생산 비용을 낮출 수 있는 공급 촉진 정책에 초점을 두고 있다. 또한 인플레이션 감축법에 따라 수소 1 kg당 최대 3달러, 관련 시설 투자 시 최대 30%까지 세제 혜택을 제공하는 정책을 발표하여 수소경제로의 전환을 국가 차원에서 지원하고 있다⁷⁾.

2.1.3 일본

일본은 2017년 12월 수소 기본 전략을 채택하고 2050년까지의 로드맵을 제시하였다. 일본의 경우 후쿠시마 사고 이후 자립형 에너지 공급을 위해 수소 경제를 집중적으로 육성해 왔으며, 천연가스 개질 수소 생산 기술 및 액화 기술 개발 등에 선도적인 역할을 하고 있다. 로드맵의 주요 내용으로는 호주 갈탄 등 해외 미이용 에너지를 활용한 국제 수소 공급망 구축 등이 있으며, 재생에너지 및 미이용 지역 자원을 적극 활용하여 수소를 생산하는 방식에 대해 제시하고 있다. 활용 측면에서는 수소 발전을 통한 안정적이고 대용량 소비를 중심으로, 모빌리티(수소차, 선박, 기차, 지게차 등) 분야의 수소 이용 확산과 가정용 연료전지를 활용한 에너지 절감 등을 목표로 두었다. 일본의 경우 저비용 수소 이용과 액화수소, power-to-gas (P2G), 해외 생산 등 수소 공급 체인 개발에 주력하고 있다⁸⁾.

2.1.4 중국

중국은 2021년 3월, 2030년 전에 국가 탄소 배출량의 정점을 찍고 2060년까지 탄소중립 달성을 목표로 하는 ‘3060 목표’를 발표하면서 국가적 에너지 체계를 청정 및 저탄소로 전환하고 있다. 탈탄소와 탄소중립 달성의 주 에너지원으로 수소를 선정하였으며, 주요 기업들을 중심으로 수소에너지 산업 발전을 추진하고 있다. 중국의 수소 시장 규모 및 성장률은 2020년을 기점으로 빠르게 증가하고 있다. 중국은 ‘친환경 자동차 산업 발전 계획(2020-2025년)’을 통해 2025년 판매 자동차의 20%를 친환경 자동차로 보급하겠다는 계획을 발표하였다. 이와 관련하여 공용 충전소 및 스마트 시티 등 대형 투자를 위한 시설 계획도 함께 제시하였다. 수소충전소 규모를 살펴보면 중국은 351기를 보유하고 있어 가장 많은 수소충전소를 보유하고 있으며, 이는 전 세계 수소충전소의 약 32.2%를 차지한다. 이와 같이 중국은 수소에너지 관련 기술을 선점하기 위해 대규모 연구개발비를 투자하고 있으며, 연료전지 및 수송 부문에서의 시장 점유율을 늘려가고 있다⁹⁾.

2.1.5 호주

호주는 2019년에 ‘Australia’s national hydrogen strategy’를 채택하여 청정수소에 대한 정책을 발표하였다. 이 전략의 가장 큰 핵심 요소는 대규모 수요 클러스터를 기반으로 수소 허브를 구축하는 것이며, 2020년부터 2030년까지 10년간 수소에 대한 투자 및 세부 전략과 법규 등을 명시하였다. 또한 2020년에는 ‘technology investment roadmap’을 통해 그린수소, 에너지 저장, CCUS 기술 등의 탄소 저감을 위한 기술 개발에 집중 지원한다는 내용이 담겨있다. 2021년에는 수소 생산 과정의 투명성을 보장하기 위해 원산지 보장 인증 제도(guarantee of origin certification scheme)를 도입하였다¹⁰⁾.

호주는 일본, 싱가포르, 독일, 한국 등 국외 협력을 통한 수소시장 선점을 확대해 나가고 있다. 2022년 2월에는 세계 최초 액화수소 운반선으로 호주에서 생

산한 액화수소를 일본까지 운반하는 실증 운항을 완료하였고, 싱가포르와 독일과는 그린수소와 관련된 협업을 통해 프로젝트를 통한 투자 협약을 체결하였다. 한국과 호주는 수소경제 및 재생에너지 협력을 논의하고 수소차 및 연료전지(한국) 분야와 수소에너지 생산(호주) 분야의 경제 협력을 이어나가기로 합의하였다.

2.2 국내 정책

국내에서는 2019년 1월 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 통해 세계 최고 수준의 수소경제 선도 국가로 도약하기 위한 비전을 발표하였다. 특히 수소차와 연료전지를 중심으로 수송과 발전 부분에서 수소경제를 선도할 수 있는 산업 생태계를 구축하는 것을 바탕으로 경제적이고 안정적인 수소 생산 및 공급 시스템 조성을 제시하였다. 이를 이행하기 위한 수소경제 이행 기반 마련으로 범부처 수소 기술 개발 로드맵 수립, 생태계 조성, 안전관리 기준 및 관련 법 제정 등에 체계 확립 등의 추진 전략을 발표하였다. 이후 2019년 10월 수소에너지 분야 국내 기술 경쟁력 제고를 통해 수소경제 이행을 뒷받침하고자 범부처 수소 기술 개발 로드맵을 수립하였다^{11,12)}.

2020년 10월 7일에는 ‘수소선도 국가 비전’이 발표되었다. 이는 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 방안으로 수소 산업이 선택되었다는 것을 의미한다. 비전 발표를 통해 정부는 2030년까지 국내 청정수소 100만 톤 생산 체계를 구축하고, 글로벌 수소기업 30개를 육성, 수소 관련 일자리 5만 개를 창출한다는 내용과 이를 위해 2030년까지 43조 원을 투자하겠다는 계획을 발표하였다.

2021년 11월 26일에는 “수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(이하 수소법)” 시행 이후 첫 번째 법정 기본 계획인 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’을 발표하였다. 본 계획에는 국내의 청정수소 생산 주도, 빈틈없는 인프라 구축, 모든 일상에서 수소 활용, 생태계 기반 강화 등 4대 전략을 토대로 15개 추진 과제가 담겨있다. 정부는 국내의 수소 생산을

청정수소 공급 체계로 전환하고, 2050년까지 연간 2,790만 톤의 수소를 모두 그린수소와 '블루수소'로만 공급한다는 계획을 발표하였다. 생산뿐만 아니라 수소 발전도 본격적으로 상용화하기 시작하여 연료전지 발전 설비 보급 확대, 석탄, 암모니아 혼소 발전(혼합연소), liquefied natural gas (LNG) 수소 혼소 등에 적용하기로 하였다. 모빌리티 부분에서는 2030까지 수소차 성능을 내연기관차와 동등한 수준으로 끌어올려 2050년까지 수소차 생산을 연간 526만 대로 키우고, 선박, 드론, 트램 등 다양한 운송 수단으로 수소 적용을 확대할 예정이다. 또한, 철강, 석유화학, 시멘트 등 온실가스 고배출 산업의 공정을 수소 기반으로 전환하고, 연료 및 원료도 수소로 대체한다는 계획을 가지고 있다. 이를 위해 수소 관련 범부처 연구개발을 추진하고, 전문 인력 양성도 지원할 예정이다. 본 기본 계획이 이행될 경우 2050년 최종 에너지 소비의 33%, 발전량의 23.8%를 수소가 차지할 것이며, 이는 수소가 단일 에너지원 가운데 최대 에너지원이 된다는 의미이다¹³⁾.

2021년 12월에는 국가 필수 전략 기술로 수소를 선정하였으며, 새 정부의 첫 번째 수소경제위원회를 통해 '청정수소 생태계 조성 방안(산업통상자원부)', '세계 1등 수소산업 육성 전략(산업통상자원부)', '수소기술 미래 전략(과학기술정보통신부)' 등을 발표하여 대규모 수소를 창출하고 규제를 완화하여 수소 분야 초격차 기술 확보를 추진하는 방안을 제시하였다. 수소 생태계 고도화를 통한 청정수소 선도국가 도약을 이루고자 청정수소 생태계 조성방안을 발표하고, 2023년 11월에는 청정수소 인증제 시행을 위한 청정수소 인증 기준 및 절차, 인증 사후 관리, 인증기관 지정 등에 대한 근거 규정을 마련하여 수소법 시행령을 일부 개정하여 발표하였다. 최근에는 청정수소 인증제를 통해 온실가스 배출량이 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인증하고 연계 인센티브를 제공하는 제도에 대해 논의 중이며, 이를 통해 청정수소의 범위를 넓혀 생태계 구축을 위한 지원책을 마련하고 있다. 따라서 수소는 2050년 탄소중립을 위한 가장 강력한 수단이 될 것이며, 정부에서는 수

소경제 선도 국가로 도약하기 위해 향후 다양한 정책을 지속적으로 제시할 예정이다.

3. 수소 밸류체인별 기술 개발 현황

수소 기술의 밸류체인은 생산, 저장 및 운송, 활용 등 세 가지 부분으로 나눌 수 있다. 수소 생산의 기본 재료는 화석연료, 재생에너지, 해외 수입 등으로 나눌 수 있으며, 생산되는 수소를 부생수소, 추출수소, 그린수소 등으로 구분한다. 수소 저장에는 저장탱크, 트레일러 등 물리적 저장 방식과 화합물 저장 방식으로 구분 지을 수 있다. 운송 측면에서는 튜브 트레일러를 통한 운송 및 장기적으로는 천연가스 배관을 활용한 공급이 가능하다. 본문에는 수소 생산-저장-활용에 대한 밸류체인별 기술을 상세히 설명하고, 이를 기반으로 Table 2에 정리하였다.

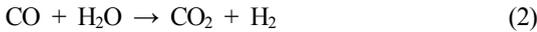
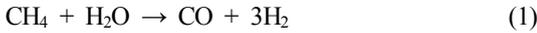
3.1 수소 생산

수소의 생산은 수소를 포함한 화합물로부터 수소를 제조하는 기술로, 제조 원료 및 제조 방법에 따라 세분화된다. 수소는 생산 방식에 따라 각각의 색깔을 명시하는데, Fig. 1과 같이 총 9가지 종류가 있다.

본 논문에서는 천연수소, CCUS 기술 연계 블루수소, 수전해 등 신재생에너지 연계 그린수소 등 세 분야로 나누어 기술 동향 현황에 대해 분석해 보고자 한다¹¹⁾.

3.1.1 블루수소

천연가스인 메탄을 고온, 고압에서 수증기 개질 반응(steam methane reforming, SMR)을 이용하여 분해하면 수소가 추출되는데, 이를 그레이수소라고 한다. SMR을 활용한 수소 생산 방식은 이미 상용화된 방식이며, 저렴한 생산 단가로 대용량으로 수소를 생산할 수 있다는 장점이 있지만, 수소 제조 과정에서 온실가스인 CO₂가 발생한다는 단점이 있다. SMR 공정을 이용한 수소 생산 반응¹⁴⁾은 다음과 같다.



탄소중립의 주 에너지원으로 수소를 사용하기 위해서는 배출되는 CO₂를 처리해야 하므로 CCUS 기술을 적용하는 방안이 연구되고 있으며 이를 블루수소라고 한다. 그레이수소 생산의 단가는 \$1.3/kg으로 가격 측면에서 경쟁력이 있지만 블루수소 생산을 위해 현재 수준의 CCUS 기술을 접목시키게 되면 약 2배 정도 많은 비용이 발생하게 된다. 이처럼 블루수소를 상용화하고 대용량으로 공급하기 위해서는 성숙된 CCUS 기술을 확보하여 경제성을 확보하는 것이 매우 중요하다. CCUS 기술은 이산화탄소 포집·

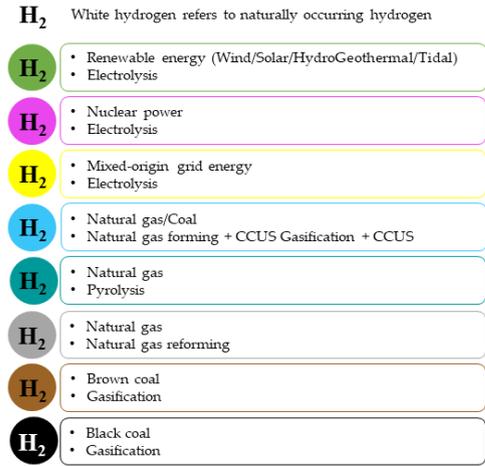


Fig. 1. The hydrogen color spectrum by production sources¹¹⁾

Table 2. Definition and detailed technology information by hydrogen value chain¹¹⁾

	Definition	Current status	Specific technology	Future technology
Production	A technology for producing hydrogen from a compound containing hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> Large amounts of CO₂ emissions during hydrogen production 	<ul style="list-style-type: none"> White hydrogen Blue hydrogen Green hydrogen Pink hydrogen 	Securing blue hydrogen production system to respond to initial hydrogen demand Securing green hydrogen technology using water electrolysis systems
Storage	Storage of hydrogen for purpose	<ul style="list-style-type: none"> Lack of physical and chemical technology for hydrogen storage 	<ul style="list-style-type: none"> Physical storage <ul style="list-style-type: none"> Liquid hydrogen storage Geological storage Chemical storage <ul style="list-style-type: none"> Ammonia Liquid organic hydrogen carrier (LOHC) 	Large-capacity hydrogen storage system Development of hydrogen storage materials and containers
Transportation	Technology for transporting, distributing, and supply accordingly	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen import/export base required 	<ul style="list-style-type: none"> Land transportation Marine transportation Air and space transportation Pipelines Tube trailer Liquid tanker truck 	Mobility for bulk transportation
Application	Power generation and industrial systems that utilize hydrogen to produce electricity and heat	<ul style="list-style-type: none"> Greenhouse gas emissions from coal power generation, steel industry, cement manufacturing industry, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Energy generation <ul style="list-style-type: none"> Fuel cell Carbon-free fuel generation Industry <ul style="list-style-type: none"> Industrial fuels Raw materials 	Development of fuel cell materials and components and power generation system Securing a power generation system using carbon-free fuel

활용(carbon dioxide capture and utilization, CCU) 기술과 이산화탄소 포집·저장(carbon dioxide capture and storage, CCS) 기술로 구분할 수 있는데, 현재는 CCU 기술보다는 기술 성숙도가 높고 대용량의 CO₂를 가스전 등 지하 공간에 저장할 수 있는 CCS 기술을 적용하는 것이 블루수소의 보급 측면에서 경제성이 있다.

최근 국내에서도 “동해가스전을 활용한 CCS 통합 실증 사업”과 연계하여 국내 최초의 블루수소의 생산 사업을 진행하고 있다. 위 사업은 국내 최초 상용 규모의 R&D 사업인 동시에 국내 최초 블루수소 생산 사업으로 안전성과 경제성이 매우 우수한 실증 사업이다. 또한 충남 보령에 세계 최대 블루수소 플랜트가 건립될 예정이며 2025년부터 수소 25만 톤을 생산하여 수소발전소 및 수소충전소에 공급하는 것을 목표로 하는 사업이 시행된다.

탄소중립 정책을 달성하기 위해 경제성, 안전성, 사업성 등을 모두 만족하는 상용 수소를 공급하기 위해 블루수소의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 블루수소의 대규모 생산 및 활용이 이루어지기 위해서는 CCUS 기술의 성숙도를 향상시키는 것이 매우 중요하며, 기술 성숙도 전 단계에 걸친 모든 연구의 유기적인 발전이 상용화 속도를 앞당기는 중요한 요소가 될 것이다.

3.1.2 그린수소

탄소 배출이 전혀 없는 그린수소를 생산하기 위해서는 태양광, 풍력 등 재생에너지를 활용하여 생산한 전기를 사용해 물을 분해해야 한다. 이렇듯 그린수소 생산에서 가장 중요한 부분은 재생에너지 전력 확보와 수전해 기술이다. 따라서 재생에너지 전력을 활용해 수소를 생산하는 기술을 연계하여 P2G 기술을 함께 개발해야 한다.

현재 해상 풍력 등 대규모 재생에너지 발전 단지에서 수소를 대량으로 생산하려는 실증 연구를 진행 중이며, 페도로 또는 도로 상부, 매립지 또는 매립 예정지 등에 대규모 태양광을 설치하여 수소를 생산하는 태양광 + P2G에 대한 연계도 추진 중이다. 특히

제주도에서는 국내 최초로 재생에너지 연계 대규모 그린수소 생산, 저장, 활용 실증을 진행하여 그린수소 상용화 기술을 적극적으로 개발하고 있다¹⁵⁾.

하지만 국내는 대규모 재생에너지 단지가 부족하여 재생에너지를 활용한 수전해 기술 개발 및 실증, 상용화 기술 확보가 지연되고 있다. 그린수소를 만드는 비용의 약 80%가 재생에너지에서의 전기 생산 비용이므로 전기 생산 단가의 가격 경쟁력이 없다면 국내 그린수소 상용화 측면에서 어려움이 발생한다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 일부 물량에 대하여 해외 생산 수소를 수입하는 방안을 추진하고 있다. 해외 생산 수소 수입은 안정적 수소 수급과 가격 안정에 도움이 된다는 것이 가장 큰 장점이며 국내 수소 제조 시 발생하는 비용 및 온실가스 배출 문제를 줄일 수 있다. 또한 수소를 수입하기 위해서는 저장 용기 및 관련 기술을 보유한 수소 운반 선박 등이 개발되어야 하므로 관련 산업의 육성 측면에서도 긍정적인 부분이 있다. 해외 수소를 안정적으로 수입하기 위해서는 현재 LNG와 같이 수소 인수기지 및 저장 시설에 대한 인프라를 확충하고 관련 기술을 개발해야 한다.

정부의 수소경제 활성화 로드맵을 통해 수전해 및 해외 도입 수소 활용 등을 통한 그린수소 생산국 도약이라는 목표가 제시되었다. 이와 연계하여 수소 생산량을 2018년 13만 톤에서 40년 526만 톤으로 확대하고, 대량 안정적 공급으로 수소 가격을 3,000원/kg 이하로 하락을 유도한다는 계획이다. 따라서 그린수소의 생산 기술은 수소 보급 및 가격 안정성 측면에서 매우 중요한 부분이다.

3.2 수소 저장

수소 저장 방식은 크게 물리적 저장과 화학적 저장 방식으로 나눌 수 있다. 수소는 상온에서 부피가 크기 때문에 비용 절감을 위해 대량으로 저장 및 운송할 수 있는 기술이 뒷받침되어야 하지만, 기체수소를 압축하여 저장, 운송하는 방식 외에는 기술적으로 아직 개발 단계에 있다. 따라서 기체 저장 및 운송 기

술을 고도화하여 수소 운송량을 증대하고, 수소를 대량으로 안정성 있게 저장, 운송할 수 있는 액체수소 및 액상수소화물 저장 기술 개발이 추진 중이다¹¹⁾.

3.2.1 물리적 저장

3.2.1.1 액체수소 저장

액체수소 저장은 수소를 냉각시킨 뒤 압력을 가해 액화된 수소를 저장하는 방식이다. 온도가 내려가면 수소의 부피가 약 1/800 수준으로 줄어들기 때문에 저장 효율도 증가한다. 또한 상온에서보다 압력을 덜 가하더라도 부피가 줄어드는 장점이 있으며 저온이기 때문에 폭발 위험성이 감소하게 된다. 현재 주로 사용되는 고압 저장 수소 탱크와 달리 대기압에서도 저장이 가능해 운송이 더욱 안전하고 저렴해진다는 장점이 있다. 그러나 액체수소를 만들기 위해서는 수소의 온도가 -253°C 가 되어야 하므로 이를 위한 에너지 소모가 매우 크며, 비용적인 부담이 있다는 단점도 존재한다. 따라서 LNG가 기화할 때 -162°C 의 냉열이 발생하므로 이를 활용하여 경제성을 높이는 연구도 진행되고 있다. 국내에서는 효성중공업이 린데와의 합작 법인을 만들어 액체수소 공장 착공에 들어갔으며, 미국, 일본, 유럽 등에서는 수소 액화 플랜트를 상용 판매 및 운영 중이다¹¹⁾. 또한 SK E&S도 인천에 액화수소 플랜트를 완공하였으며, 인프라 확충에 적극적으로 나서고 있다.

3.2.1.2 지하 저장

수소의 공급 인프라가 확충되고 수요가 증가하게 되면 튜브 트레일러 등에 의존하기에는 한계가 있으며 중대형 저장 시설이 필요하다. 현재 미국이나 유럽 등 해외 선도국들은 이러한 수소에너지 저장 수요를 충당하기 위해 지하 저장 기술의 개발을 추진하고 있다. 지하 저장 기술은 안전성, 부지 선정 및 저장 용량 한계 완화의 측면에서 장점을 갖는 기술로, 국토의 면적이 좁고 인구 밀도가 높은 국가에서는 반드시 고려해야 할 기술이다¹⁶⁾.

액체수소와 같이 -253°C 수준의 극저온 액체수소

를 지상에 저장하는 경우 기후 변화나 계절에 따른 온도 변화에 의해 기화 손실률이 크게 발생하며, 지진이나 태풍, 폭염, 테러 등 재난재해 및 사고의 위험성에 노출되어 안정성이 떨어지게 된다. 지상 수소에너지 저장 시설은 안전에 대한 위험뿐 아니라, 대규모 저장을 위해서는 부지 선정에 대한 어려움 및 비용 부담이 존재하게 된다. 이러한 시설들은 대부분 도시 외곽에 위치하게 되므로, 운송에 따른 경제성 감소와 더불어 혐오 시설로 인한 주민 수용성에 대한 문제가 있다¹⁶⁾.

현재 국내외의 수소 에너지 지하 저장 사례들은 모두 암염동이나 폐유전, 폐가스전 등 기존 환경을 이용해 기체수소를 저장하는 기술이다. 극저온의 온도 조건이 유지되어야 하는 경우, 암반이 단열재 역할을 수행함과 동시에 지상의 온도 변화로부터 고립되어 기화에 의한 손실을 최소화 할 수 있다. 지하 공동식 저장 기술은 이러한 액체수소 저장에 최적화된 저장 기술이다. 지하 공동식 극저온 액체수소 저장 기술은 지상에 노출되는 부분이 극히 적어 부지 활용도가 높으며, 발전 및 생산 시설과 공동 인프라 구축에 유리하다¹⁶⁾.

국제 에너지 기구(International Energy Agency)에 속해있는 글로벌 기술 네트워크 단체 프로그램인 Hydrogen Technology Collaboration Programme에서는 수소의 공급량이 전 세계적으로 많이 증가되는 2030년 이후에는 대규모 지하 저장 시설과 그에 따른 운송 기술이 반드시 필요할 것으로 보고하며 그 중요성을 강조하였다.

국내에 수소 지하 저장 시설을 구축하게 되면 국내 생산 및 해외 생산 수입 수소의 저장 측면에서 매우 유리할 것으로 판단된다. 또한 이를 통해 모빌리티 뿐 아니라 발전 및 산업 용도로 대용량의 수소를 활용할 수 있는 기반이 마련될 것이다.

3.2.2 화학적 저장

수소의 화학적 저장은 암모니아 또는 유기수소화물(liquid organic hydrogen carrier, LOHC) 등의 화합물을 이용하여 수소를 다른 물질로 변화시켜 액상

저장하는 방식이다. 탄소 화합물이 포함된 물질로 변화시키면 LOHC가 되고, 포함되지 않으면 무기수소 화물이 되는데 가장 대표적인 무기수소화물은 암모니아이다.

3.2.2.1 암모니아

암모니아 활용 저장 방식은 수소를 암모니아로 바꿔서 저장하고 사용 시 다시 암모니아를 수소로 전환시키는 방식이다. 암모니아는 상온, 상압에서 액체 상태로 운송 및 저장이 가능하고 액체수소와 같은 부피에서 2배 높은 저장 밀도를 가지고 있으며 -33°C 에서도 액체 상태를 유지하여 액체수소 대비 액화에 필요한 에너지가 낮다는 장점이 있다. 수소로 바꿀 때도 수전해 추출보다 암모니아 추출 시 적은 전압을 필요로 하며 반응 속도도 빠르다. 그러나 암모니아에서 수소를 추출하기 위해 전환 설비가 필요하다는 단점도 있다. 현재는 수소전기차에 암모니아를 공급하기 위한 연구가 지속적으로 수행 중이며, 국내에서는 포스코가 호주 Origin Energy, 롯데정밀화학, 한국조선해양, HMM과 함께 암모니아 생태계 구축에 노력 중이다¹¹⁾.

3.2.2.2 LOHC

LOHC는 수소화된 물질과 탈수소화된 물질이 촉매 반응을 통해 수소를 주고받는 수소 저장 방식이다. LOHC는 상온, 상압에서 수소를 액체 상태로 안전하게 대량 저장 및 운송이 가능하여 수소 인프라 구축과 수소 저장, 운송에 드는 비용을 획기적으로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존 석유 인프라(정유사, 유조선, 유조차, 파이프라인 등)를 그대로 사용할 수 있어서 현대오일뱅크, GS 칼텍스 등 정유사에서 주로 관심을 가지고 있다¹¹⁾. 하지만 수소를 저장하는 과정에서 에너지 소모가 많이 발생하고 저장 효율 및 기술 성숙도가 매우 낮으므로 상용화가 되기에는 어려움이 있다.

3.2.2.3 금속수소화물

화합물 저장은 화학물질과 수소 사이의 화학 결합력을 이용하는 기술로, 팔라듐, 마그네슘, 란타늄, 알루미늄 등과 같은 가벼운 금속 또는 이들 금속과 붕소 등을 함유한 무기물 간의 합금에 수소를 저장하는 방식이다. 금속수소화물을 이용하여 화학물질 내 수소를 가둬 두어 고체 상태로 저장할 수 있다. 그러나 이와 같은 저장 방식은 아직 개발 초기 단계이므로 저장 용량이 작고 장기적으로 기술을 확보해야 하는 문제가 남아있다¹¹⁾.

3.3 수소 활용

3.3.1 수송 분야

수소경제 활성화 로드맵 중 모빌리티 분야에는 수소승용차, 수소택시, 수소버스, 수소트럭 등이 제시되어 있다. 이는 청정 교통 인프라 확대 및 이를 위한 수소충전소를 확대하고 승용차, 버스, 택시, 트럭 등 수소차 전 차종의 생산 라인을 구축한다는 계획이다. 모든 차종을 포함한 수소차는 2040년까지 1,240만 대(내수 580만 대)를 보급하고, 수소충전소는 1,200 개소를 구축한다는 목표이다. 이를 위해 수소차의 생산 능력을 확충하고 핵심 부품을 100% 국산화가 필요하여 기술 개발 지원을 확대할 계획이다. 수소버스의 경우 인프라 구축을 통해 수소버스 보급을 확충할 계획이며 특히 경찰버스를 수소버스로 대체하기 위한 실증 및 단계적 교체가 진행 될 예정이다. 이처럼 수소차와 수소택시, 수소버스가 보급되려면 앞서 제시한 것처럼 인프라 구축이 무엇보다 중요하다. 또한 택시 및 버스 회사에 경제적, 제도적 지원을 강화하여 계획대로 보급량의 증가가 단계적으로 이루어질 수 있도록 해야 한다. 대중교통수단의 경우 여러 사람이 이용하기에 연비와 내구성이 크게 향상되어야 하며, 안전 강화를 위한 안전 기준 마련 등도 시급하다¹⁷⁾.

수소드론의 경우 리튬 배터리 드론에 비해 장시간 비행이 가능하여 농업용 등 비행 시간 확대가 필요

한 상업용 드론을 중심으로 시장 진출이 가능할 것으로 예상하고 있다. 이후 물류 배송 등의 분야를 중심으로 수소드론을 적용할 계획이며, 특히 재난 발생 시 인명 수색 등 초동 대응용 드론 상용화를 추진 중이다.

3.3.2 발전 분야

발전 분야에서는 수소를 에너지원으로 사용하여 친환경 분산형 전원으로 사용하는 것을 목표로 한다. 가정 및 건물용 연료전지는 현재 7 MW에서 2040년 2.1 GW로 보급 목표를 설정하였으며, 발전용 연료전지의 경우 현재 307.6 MW에서 2040년 기준 15 GW로 크게 확충할 계획이다. 연료전지 설치 확대를 통해 설치비, 발전 단가를 중소형 가스터빈 수준으로 대폭 절감하고, 설치 확대와 연계하여 부품 국산화 100% 달성을 통해 산업 생태계를 조성하는 것을 추진 중이다. 연료전지 보급에 따른 연료전지 전용 가스요금제 도입, 그린수소 renewable energy certificate (REC) 우대 등을 통해 투자 불확실성 제거 및 경제성 확보를 지원할 예정이다. 중장기적으로는 수소가스터빈 발전 기술 개발을 통해 2030년 이후 상용화를 추진할 계획이다. 구체적으로는 발전용 연료전지의 경우 2022년 누적 1 GW 보급 시 규모의 경제를 통한 단가 절감이 가능하며, 2040년에는 현재 대비 설치비 35%, 발전 단가 50% 수준을 달성한다는 계획이다¹⁷⁾.

연료전지를 보급하기 위해서는 경제성 확보가 가장 중요한 요인이다. 정부에서는 경제성을 확보하기 위해 연료전지 전용 LNG 요금제를 신설하고, 일정 기간 연료전지 REC를 유지하여 투자 불확실성을 제거한다는 목표를 제시하였다. 또한 중장기적으로는 그린수소를 활용한 경우 REC를 우대할 방침이다. 국내 기술 현황을 보면 셀 전극·촉매 및 연료 변환기 촉매에 대한 연구가 미흡하다. 연료전지 핵심 부품의 국산화율 100% 달성을 위해 2022년까지 촉매 등 수입 소재를 제외한 전 부품 국산화를 완료하고, 장기적으로 수입 소재(촉매, 전극, 분리판)에 대한 기술 개발을 추진하여 비용 측면에서 경쟁력을 확보한다

는 계획이다¹⁷⁾.

발전 분야에서 중요한 기술인 수소가스터빈의 경우 재생에너지 단점을 보완하는 측면에서 필요하다. 수소가스터빈의 경우 수소 혼소(대형)와 수소 전소(소형)로 구분하여 기술 개발을 추진하고, 실증 인프라도 동시에 구축할 예정이다. 수소 혼소의 경우, 기술 개발 및 실증 연구를 통해 2026년에 대형 가스터빈 적용을 확대하고 2030년 이후 상용 적용을 추진한다는 목표를 제시하였다. 또한 수소 전소의 경우, 2026년에 1 MW 수소가스터빈 공동 개발 및 실증을 통해 2028년 사업화를 추진할 계획이다. 수소가스터빈 기술이 개발되면 발전소에 적용하여 실증을 통해 수소 혼소 기술을 확대 적용할 방침이다¹⁷⁾.

4. 결론

한국뿐 아니라 전 세계적으로 탄소중립 정책과 관련하여 수소 기술에 대한 관심이 매우 높은 상황이다. EU는 수전해를 중심으로 그린수소 생산을 통한 탈탄소화 실현을 목표로 하고 있으며, 미국의 경우 민간 파트너십 결성을 통한 대규모 인프라 투자를 통해 청정수소 생산 단가를 획기적으로 낮추는 방향으로 수소경제를 실현하기 위해 앞장서고 있다. 일본의 경우 세계 최초 수소 사회 실현을 목표로 수소 관련 전략을 마련하여 관련 기술 개발에 힘쓰고 있다. 중국은 탄소중립을 실현하기 위해 수소 에너지원을 사용할 계획으로 그린수소 중심의 정책을 발표하고, 세계 최초 그린수소 표준을 마련하였다. 호주의 경우 대규모 클러스터를 조성하여 수소 허브를 구축하고, 이를 기반으로 주변국과의 협력을 통해 수소 공급에 앞장서고 있다. 국내에서는 수소경제 이행을 위한 지침과 정부 차원의 수소 기술 개발 로드맵을 발표하고, R&D 뿐 아니라 정책적, 제도적인 부분을 지원한다고 발표하였다. R&D의 경우, 수소 생산, 저장 및 운송, 활용 등 전 밸류체인을 포함하는 로드맵을 제시하였으며, 특히 생산, 저장 및 운송 분야는 기초, 원천부터 실증 및 상용화 전주기를 R&D와 연계하여 확산 지원을 목표로 하고 있다. 활용 부문에서는 수

소차 및 연료전지의 글로벌 초격차 유지를 위해 핵심 기술 국산화를 지원할 예정이며, 수소충전소 등 인프라 상용화 및 구축을 위해 대규모 실증 플랫폼을 구축한다고 발표하였다. 또한 수소 기술 밸류체인 전 분야의 안전성을 확보하여 수소경제를 안정적으로 이행한다는 계획이다. 이를 위해 안전 관리 전문 인력을 양성하고 핵심 기술 개발을 위한 인력 양성에도 큰 지원을 할 예정이다. 또한 수소경제를 선도하기 위해 기술 개발 국산화 뿐 아니라 국제 표준화 활동을 주도하여 표준 협력 체계 구축을 추진할 것이다. 수소산업 클러스터 및 수소 도시를 조성하고, 수소경제 지원을 위한 법 제정을 통해 제도적 기반도 완비할 예정이다.

수소경제 이행을 위해 대규모 수소의 공급 목표를 설계하고, 2050년까지 해외 수입 수소 도입을 대부분으로 하여 수소 생태계를 위한 공급을 현실화 한다는 계획이다. 이를 위해서는 수소의 해외 수입을 위하여 국가 간 협력 체계를 구축하고 이를 법, 제도화하는 것이 매우 중요할 것이다.

현재 단계에서는 해외에서 생산되는 블루수소를 경제성 있게 국내로 수입하기 위해서 국외 또는 국내의 청정수소 인센티브 등을 사용해야 하므로, 국내에서도 청정수소를 인증할 수 있는 온실가스 배출량 기준을 확립하고, 이를 기반으로 하는 인센티브 제도를 마련해야 한다. 수소경제를 실현하기 위해서는 수소를 에너지원으로 사용하는 모빌리티, 발전, 산업 분야가 확장하고 성장할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 기반 기술의 국산화가 매우 중요하다. 수소경제를 위한 초기 단계인 만큼 R&D 분야 및 보급 측면에서도 기초 수준에 해당하지만, 정부 및 세계적 관심과 지원을 통해 전 밸류체인에 해당하는 수소 기술 개발을 통해 한국이 수소경제를 선도하는 국가로 발전할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 한국지질자원연구원 기본 사업(지질자원 표본·기초학술연구와 탈추격 R&D 정책/성과확산

연구-선도형 지질자원 R&D 정책개발, 23-3120-1)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

1. C. Kim, G. Kim, and H. Kim, "Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: <https://doi.org/10.7316/JHN E.2023.34.2.122>.
2. International Energy Agency (IEA), "Global hydrogen review 2022", IEA, 2022, pp. 1-284. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>.
3. D. Tasić, "A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe", H2GreenTECH, 2021. Retrieved from <https://www.h2greentech.eu/a-hydrogen-strategy-for-a-climate-neutral-europe/>.
4. European Commission, "Energy roadmap 2050: impact assessment and scenario analysis", European Commission, 2011. Retrieved from https://energy.ec.europa.eu/system/files/2014-10/roadmap2050_ia_20120430_en_0.pdf.
5. H. J. Cho, "EU's announcement and impact of green hydrogen standards", KEPCO Management Research Institute, 2023. Retrieved from https://home.kepco.co.kr/kepco/KR/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardSeq=21062160&boardCd=BRD_000518&menuCd=FN3119.
6. Fuel Cell and Hydrogen Energy Association (FCHEA), "Road map to a US hydrogen economy", FCHEA, 2020. Retrieved from <https://www.fchea.org/us-hydrogen-study>.
7. Department of Energy (DOE), "U.S. national clean hydrogen strategy and roadmap", DOE, 2023. Retrieved from <https://www.hydrogen.energy.gov/library/roadmaps-vision/clean-hydrogen-strategy-roadmap>.
8. Ministerial Council on Renewable Energy, "Basic Hydrogen Strategy", Ministry of Economy, Trade and Industry (Japan), 2017. Retrieved from <https://policy.asiapacificenergy.org/node/3698>.
9. S. R. Lee, J. Y. Ahn, Y. J. Heo, Y. B. Yang, S. K. Lee, and X. Ou, "China's hydrogen energy industry support policy and Korea-China cooperation plan", Korea Institute for International Economic Policy, 2022. Retrieved from https://www.kiep.go.kr/gallery.es?mid=a10101080000&bid=0001&list_no=10564&act=view.
10. Australian Government, "Australia's National Hydrogen Strategy", Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, 2023. Retrieved from <https://www.dcc.gov.au/energy/publications/australias-national-hydrogen-strategy>.

11. J. E. Shin, "Hydrogen Technology Development and Policy Status by Value Chain in South Korea", *Energies*, Vol. 15, No. 23, 2022, pp. 8983, doi: <https://doi.org/10.3390/en15238983>.
12. K. H. Chu, J. Lim, J. S. Mang, and M. H. Hwang, "Evaluation of strategic directions for supply and demand of green hydrogen in South Korea", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 3, 2022, pp. 1409-1424, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.107>.
13. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Basic plan for the implementation of the first hydrogen economy", MOTIE, 2021. Retrieved from https://www.motie.go.kr/motie/ne/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=67130&bbs_cd_n=6.
14. S. Son, "Preliminary thermodynamic evaluation of a very high temperature reactor (VHTR) integrated blue hydrogen production process", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 3, 2023, pp. 267-273, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.3.267>.
15. Korea Trade-Investment Promotion Agency (KOTRA), "Trends in major countries' hydrogen economy and Korean enterprise entry strategies", KOTRA, 2022. Retrieved from https://dream.kotra.or.kr/kotranews/cms/indReport/actionIndReportDetail.do?pageNo=1&pagePerCnt=16&MENU_ID=280&CONTENTS_NO=1&pRptNo=13295&pHotClipTyName=DEEP&pStartDt=&pEndDt=&sSearchVal=%EC%A3%BC%EC%9A%94%EA%B5%AD+%EC%88%98%EC%86%8C%EA%B2%BD%EC%A0%9C+%EB%8F%99%ED%96%A5+%pRegnCd=&pNatCd=&pIdstrCate=&pNttCtgrYsn=
16. E. S. Park, Y. B. Jung, and S. Oh, "Carbon neutrality and underground hydrogen storage", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 59, No. 5, 2022, pp.462-473. doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.5.462>.
17. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE), "Roadmap to revitalize the hydrogen economy", MOTIE, 2019. Retrieved from https://www.motie.go.kr/motie/py/td/Industry/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=72&cate_n=1&bbs_seq_n=210222.